مقایسه طرح اختلاط و مقاومت فشاری بتن‌های سبک ساخته شده با سبک‌دانه‌های لیکا، اسکریا و پرلیت با استفاده از روش پیچش*

محمود نادری [۱]   علیرضا بنیادی [۲]

چکیده باتوجه به رشد روز افزون تقاضا برای استفاده از بتن سبک، به ویژه بتن سبک سازه ای و بالا بردن ضریب اطمینان سازه در برابر زلزله بنا به آئین نامه ۲۸۰۰، پژوهش برای به دست آوردن نتیجه‌های بهینه از بتن های سبک امری اجتناب ناپذیر است. از آنجا که یکی از روش‌های تولید بتن سبک استفاده از دانه‌های سبک می‌باشد و با توجه به نقش این دانه‌ها در مقاومت بتن، ارائه طرح اختلاط بهینه برای بتن‌های سبک‌دانه اهمیت دارد. در این مقاله، بتن‌های سبک‌دانه ساخته شده با ۳ گونه سبک‌دانه لیکا، پرلیت و پوکه معدنی اسکریا مورد بررسی قرار گرفته اند. با استفاده از بتن‌های یاد شده، ۱۲۰ نمونه مکعبی استاندارد با آزمایش‌های مقاومت فشاری معمول و روش پیچش آزموده شدند. افزون بر ارائه وابستگی میان نتیجه‌های حاصل از آزمایش‌های پیچش و مقاومت فشاری، تاثیر افزودنی‌ها در ویژگی‌های بتن‌های به‌دست آمده نیز ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی بتن سبک‌دانه، لیکا، پرلیت، پوکه معدنی، مقاومت فشاری، روش پیچش.

Comparison of Mix-Design and Compressive Strengths of Leca, Scoria and Perlite Lightweight Concretes with Using Twist-off Method

M. Naderi   A. Bonyadi

Abstract *Regarding the increasing demand for lightweight concrete especially lightweight structural concrete, and safety requirements underlined in 2800 Iranian standard, research to achieve the optimized results in lightweight concrete production seems inevitable. Since, one of the commonly used methods for producing the light eight concrete, utilizes the light weight aggregates with significant role in the concrete strength, proposing the optimized mix-design for the light weight concrete appears to be important. In this paper, concretes made from leca, perlit and scoria, are investigated. By using the light weight concrete, 120 cubic specimens were constructed and tested by compression and twist-off methods. In addition to the relationships between the results of compression tests and twist-off method, effects of the additives on the properties of the lightweight concretes are presented.*

Key Words Lightweight Aggregate Concrete, Leca, Scoria, Perlit, Compressive Strength, Twist-off Method.

---

*نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۱۳۸۹/۱۰/۱ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۱۳۹۰/۱۰/۲۷ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده ی مسئول، دانشیاردانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

(۲) دانش آموخته‌ی کارشناس ارشد سازه دانشگاه بین المللی امام خمینی(ره)

مقدمه

گرچه استفاده از بتن سبک بـه عنـوان مصـالح سـبک در صنعت ساختمان سازی در حدود ٦٠ سـال قـدمت دارد، ولی پیشینه استفاده از مصالح سبک به زمـان روم باسـتان برمی گردد. جائی کـه رومیـان باسـتان در سـاخت بنـای تاریخی ورزشگاه کلوزیوم و معبد پـائنتون، از سـبک‌دانـه پومیس استفاده کردند [1]. در اوایل قرن بیسـتم در زمـان جنگ جهـانی اول، بـتن سـبک بـه علـت کمیـاب شـدن ورق‌های فولادی، در ساخت بدنه کشتی های مختلفی بـه کار رفت. نمونه‌ای از این کشتی‌ها، کشتی سلما مـی‌باشـد که در حدود ۵۰ سال بر روی آب شناور بـوده اسـت. در دهه‌ی ۵۰ میلادی استفاده از بتن سبک در سـاخت انـواع سازه‌ها رونق ویژه‌ای پیدا کرد. به طوری‌که در دهـه‌هـای ۵۰ و ٦٠ میلادی صدها سازه با به کار گیری بتن سبک در نقاط مختلف دنیا بـه ویـژه در امریکـای شـمالی و مرکـز اروپا سـاخته شـد. هتـل پـارک پـلازا در سـنت لـوییز و ساختمان ٤٢ طبقـه مسـکونی در شـیکاگو امریکـا و پـل ایستگاه قطار ویسبادن آلمان از مجموعه بناهایی می‌باشـد که در دهه‌ی ۵۰ و ٦٠ میلادی با اسـتفاده از بـتن سـبک ساخته شده‌اند و هنوز کاربری دارنـد [2]. سـبک سـازی منجر به کاهش نیروی زلزلـه وارد بـر سـاختمان شـده و علاوه بر بالا بردن سطح ایمنی لرزه‌ای سـاختمان، باعـث کوچکتر شدن ابعاد عضـو هـای سـازه‌ای ماننـد تیرهـا و ستون‌ها و دیوارهای برشی و در نهایت شالوده سازه شده و کاهش مصرف مصالح سازه‌ای بـه کـار رفتـه همچـون سیمان و میلگرد را نیز در پی خواهد داشت. همچنین، بـه علت ویژگی منحصر به فرد مصالح سنگی سبک که بیشتر متخلخل می باشند، استفاده از آن‌ها در بتن های سـازه‌ای و غیرسازه‌ای در حفظ و صرفه جویی منابع انرژی بسـیار موثر خواهد بود. با توجه به زلزله خیز بودن ایران از یـک سو و مصرف بیش از حد انرژی به دلیـل ضـعف سـامانه عایق‌بندی (صوتی و حرارتی) بیشتر ساختمان ها از سوی دیگـر، اهمیـت و لـزوم اسـتفاده از بـتن سـبک، آشـکار می‌شود. با این‌که نزدیک به یک قرن از تولید سبک‌دانـه و فن آوری‌های گوناگون تولید بـتن سـبک بـرای مصـرف سازه‌ای و غیرسازه‌ای در دنیا می‌گذرد، ولـی متاسـفانه در کشور ما هنوز استفاده از این مواد جایگاه شایسته خود را پیدا نکرده است و بخش قابـل تـوجهی از کـاربری‌هـای کنونی سبک‌دانه‌های موجود (اعم از سبک‌دانه‌ای طبیعی و مصـنوعی) بـه عنـوان پرکنـده و شـیب سـاز در صـنایع ساختمانی و راهسازی می‌باشد.

دلیل‌های عمده استفاده از بتن سبک را می‌تـوان بـه شرح زیر بیان کرد:

– کاهش بار وارده بر سازه و در نتیجه آن کاهش نیـروی موثر زلزله و دیگر بارهای جانبی.
– کاهش ابعاد سازه‌ای و غیرسازه‌ای که منجر به افـزایش فضای معماری ساختمان می شود.
– اسـتفاده از بـتن سـبک در زمینـه مقـاوم سـازی و یـا گسترش سازه هایی همچـون عرشـه پـل بـرای افـزایش ظرفیت ترافیکی، بدون اینکه تغییری در شالوده سـازه هـا به وجود آید.
– افزایش ظرفیت بار زنده سازه‌ها.
– عایق صوتی و حرارتی بسیار مناسب بـرای اسـتفاده در ساختمان‌هایی مانند بیمارستان‌ها، مدارس.
– مقاومـت مطلـوب در برابـر آتـش‌سـوزی. – افـزایش سرعت اجرا.
– امکان ساخت سازه‌های بلند مرتبه در نواحی متراکم.
– ساخت قطعات پیش سـاخته سـبک بتنـی بـه صـورت سازه‌ای و غیرسازه‌ای.

هدف اصلی در این پژوهش، بررسی بتن سبک‌دانـه از نظر ترکیب طرح اختلاط در شرایط به نسبت یکسان از نظر مقـدارهای حجمـی و همچنـین بـه کـارگیری مـواد افزودنی معدنی ماننـد میکروسـیلیس و خاکسـتر بـادی و مواد افزودنـی شـیمیائی کـه شـامل فـوق روان کننـده‌هـا می‌باشد؛ و همچنین تعیین میزان مقاومت فشاری و تعیین مقاومت تحملی پیچشی بتن سبک‌دانه و ارائه رابطـه بـین مقاومت فشاری و مقاومت به‌دست آمده از روش پـیچش بتن سبک، بوده است. با توجه بـه ایـن مطلـب کـه همـه

بتن‌های سبک به سه روش استفاده از سبک‌دانه، سبک کردن خمیره سیمان و حذف ریز دانه از مخلوط بتن ساخته می‌شود، ولی تنها بتن سبک‌دانه دارای مقاومت مطلوب سازه‌ای می‌باشد، در این پژوهش ازسه الگوسبک‌دانه مصرفی به نام لیکا، پرلیت و اسکریا استفاده شد. برای تعیین مقاومت پیچشی نمونه‌های مکعبی بتنی، از روش نوین با خرابی جزئی به نام روش پیچش بهره گرفته شده است. این روش دراساس روشی ساده، با دقت زیاد، همراه با آسیب‌های جزئی بوده و برای انجام آن نیاز به تجهیزات و مصالح خاصی نمی باشد. پس از به‌دست آوردن نتیجه‌های مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش، رابطه بین این دو کمیت برای هر یک از سبک‌دانه‌های مورد استفاده به صورت جداگانه در قالب نمودار بیان شده است. تلاش بر این است که با استفاده از نمودار واسنجی (caliberation) میان این دو کمیت، هر زمان که از روش پیچش برای تعیین مقاومت فشاری بتن سبک‌دانه در هر مکانی استفاده شد، به راحتی بتوان با تعیین مقاومت پیچشی مقطع بتنی، مقاومت فشاری آن را تعیین کرد.

مصالح به‌کار گرفته شده درساخت بتن سبک

لیکا. مواد خامی که برای سنگدانه های سبک سازه‌ای مورد استفاده قرار میگیرند، درمعمول از ته نشینی مصالح طبیعی مانند رس، شیل و اسلیت که دارای مقدار زیادی سیلیس می‌باشند، تشکیل می‌شوند. دو نوع از روش های تولید آن ها روش کوره دوار و روش رسوب گذاری است. در هر دو روش نام برده، به مواد خام تا هنگام انبساط گرما داده می‌شود. در فرایند انبساط، گرما تا زمانی ادامه می یابد که گازهای درونی آنها آزاد شده و مصالح به شکل نرم و انعطاف پذیر درآیند، ولی کامل ذوب نشوند. حباب گازهای درونی، توده‌ای از سلول‌های هوای جدا از به هم ایجاد کرده و پس از سردشدن، این مواد در درون آنها باقی می‌مانند. بنابراین، مواد خام منبسط شده و سنگدانه‌هایی با وزن مخصوص پایین‌تر به دست می‌آید [3]. در ایران تنها یک کارخانه به نام لیکا به تولید سبک‌دانه‌های رس منبسط شده می‌پردازد. ویژگی‌های فیزیکی لیکا بر اساس آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، در جدول (۱) بیان شده است.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی لیکا*

درصد جذب آب (٪)	میانگین وزن مخصوص ظاهری (دانه‌ای)(kg/m³)	نوع نمونه
١٤	٦٦٠	لیکای سازه‌ای درشت دانه
١٦	٨٦٠	لیکای سازه‌ای ریزدانه
٢٥	٥٧٠	لیکای معمولی ریزدانه

* وزن مخصوص توده‌ای لیکا در حدود ۳۳۷ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد.

پرلیت. در معمول برای به‌دست آوردن سبک‌دانه پرلیت از سنگ پرلیت، نخست سنگ پرلیت را در داخل کوره‌های دوار به دمای ۸۵۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد می‌رسانند و سنگ به صورت شیشه‌ای نرم حاصل می‌شود. در این حالت آب از لابه لای سنگ بصورت کامل تخلیه شده و توده های سنگ به اندازه ۷ تا ۱۵ برابر افزایش حجم پیدا می‌کنند. مصالح جدید که از نظر شکل بزرگ و حجیم شده‌اند، سفید رنگ در ابعاد و قطعه‌های بزرگ و نامرتب بوده و سفیدی آنها به دلیل بخارهای حاصل از تبخیر مایعات و آب از داخل سنگ می باشد. وزن مخصوص سنگ پرلیت در حالت خام و منبسط نشده در حدود ۱۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب هست. ولی وزن مخصوص حالت منبسط شده آن به صورت سبک‌دانه پرلیتی در بازه‌ی ۳۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد [4]. ویژگی‌های فیزیکی پرلیت براساس آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی پرلیت*

درصد جذب آب (٪)	میانگین وزن مخصوص ظاهری (دانه‌ای)(kg/m³)	نوع نمونه
۱۲	۲۱۰	پرلیت نیمه سازه‌ای نیمه درشت
۱۸	۳۲۵	پرلیت معمولی ریزدانه

*وزن مخصوص توده‌ای پرلیت درحدود ۱۶۲/۵ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد.

پوکه معدنی اسکریا. سنگ پا، با نام علمی اسکریا قدیمی‌ترین سبک‌دانه‌ای است که مورد استفاده قرار گرفته است. این سنگ در اثر ورود مواد مذاب آتشفشانی به مخزن‌های آب مانند دریاها و دریاچه‌ها و تخلیه‌ی گاز در هنگام انجام سریع ماگمای روان ایجاد می‌شود. از دیدگاه ماکروسکوپی، پوکه معدنی اسکریا به رنگ خاکستری تیره که به قهوه ای می‌گراید و ظاهری شبیه به سنگ پا دارد، می‌باشد [5]. ده آزمایش وزن مخصوص در حالت خشک و اشباع، آزمایش تعیین Gs مصالح، درصد تخلخل و درصد جذب آب انجام شد. آزمایش‌های این بخش براساس استاندارد ASTM-C94 و ASTM-C97 هستند. بدین صورت که با داشتن وزن مصالح در حالت خشک و اشباع در هوا و به‌صورت شناور در آب، عامل‌های مورد نظر محاسبه می شوند. جدول (۳) نتیجه‌های این آزمایش های برای پوکه معدنی اسکریا به‌کار رفته در این پژوهش را نشان می دهد. هر یک از عددهای داخل جدول (۳)، میانگین نتیجه‌های ۱۰ مجموعه آزمایش می‌باشد.

شن. در این پژوهش از شن محدوده شهرستان قزوین با ترکیبی از شن نخودی و بادامی استفاده شده است. براساس بیشتر آئین نامه های معتبر در مورد دانه‌بندی سنگ‌دانه مصرفی در بتن سبک، بیشترین قطر مجاز برای سنگ‌دانه مصرفی در داخل این بتن، به ۲۰ میلی متر محدود می شود. برابر ASTM–C33 [7] نیزمقدار پیشنهادی برای بیشترین قطر پیشنهادی برای سنگ‌دانه مصرفی در بتن سبک ۱۹/۵۰ میلی متر است. آئین نامهACI-211.2 [8]، انتخاب مصالح شامل سنگدانه برای ساخت بتن سبک سازه ای را نیز شرح داده و بیشترین قطر مجاز برای سنگ‌دانه مصرفی در بتن سبک را کوچکتر از ۰۵ /۱۹میلی متر می‌داند. از این‌رو، شن مصرفی در نمونه‌های ساخته شده، الک شده و محدوده‌ی مجاز بیشترین قطر۲۰ میلی متر مورد استفاده قرار گرفته است. وزن مخصوص ظاهری و جذب آب این شن در حدود ۲۵۵۰ کیلوگرم برمتر مکعب و ۱/۸٪ می‌باشد.

جدول۳ ویژگی‌های فیزیکی اسکریا*

درصد جذب آب(٪)	درصد تخلخل(٪)	Gs	میانگین وزن واحد حجم اشباع (kg/m³)	میانگین وزن واحد حجم خشک (kg/m³)	میانگین وزن مخصوص ظاهری (دانه‌ای)(kg/m³)	نوع نمونه
۱۵/۱۰	۷۰۰	۱۵۳۰	۱۷٦۰	۲/۰۱	۳۱	طبقه بندی نوع ۱
۱۵/۸۰	۷۵۰	۱۵۷۰	۱۸۱٦	۲/۰۸	۳۳	طبقه بندی نوع۲
۲۹/٤۳	۹۵۰	۱۵۹۰	۱۹۲۰	۲/۲۵	۵۱	طبقه بندی نوع۳

*حدود وزن مخصوص توده‌ای برای اسکریا ریزدانه ۵/ ۳۸۸ کیلوگرم بر مترمکعب وبرای اسکریا درشت دانه حدود ۵۰۰کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. دانه‌بندی کلیه سبک‌دانه هابر اساس ASTM-C330 انجام شده است و بیشترین قطر همه سنگدانه‌ها ۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [6].

ماسه. ماسه موردنظر برای استفاده در ساخت بتن سبک‌دانه از منطقه قزوین تهیه شد که وزن مخصوص ظاهری و جذب آب آن در حدود ۲٦۵۰ کیلوگرم برمترمکعب و ٤/۸٪ بود. لازم به یادآوری است که حدود ۱۸٪ از این ماسه شن بوده که جداسازی برای ساخت نمونه‌ها انجام گرفته است.

سیمان پرتلند پوزولانی. سیمان پرتلند پوزولانی معمولی، مخلوطی است از حداقل ۵ و بیشترین ۱۵ درصد پورولان طبیعی و دست کم ۸۵ درصد کلینکر یا سیمان پرتلند با نرمی مشخص که در کنار آب به صورت جسم چسبنده ای در کارهای ساختمانی مصرف می‌شود. پوزولان یک ماده طبیعی یا مصنوعی دارای سیلیس فعال یا سیلیس آلومیناتی است که به تنهایی ارزش چسبندگی ندارد، ولی به‌صورت گرد نرم و در حضور رطوبت و در دمایی معمولی با هیدراکسید کلسیم واکنش شیمیائی حاصل کرده و ترکیباتی را که ویژگی‌های چسبندگی دارد، به‌وجود می آورد. ماده پوزولانی بایستی به‌صورت آسیاب شده باشد تا در حضور آب با آهک، سیلیکات‌های کلسیم پایدار با ویژگی‌های چسبندگی ایجاد کند. مواد پوزولانی از خاکستر آتشفشانی غیربلورین – پوزولانی اصلی – پودرسنگ، سنگ‌های رسی و چرت‌های اوپالینی، خاک دیاتومه‌ای کلسینه شده، خاک رس پخته شده، خاکستر بادی و دوده سیلیسی و غیره به‌دست می آید [9]. ویژگی‌های کلی این گونه سیمان با نام سیمان نوع ۲ در ASTM-C150 آمده است.

میکروسیلیس. میکروسیلیس بسیار نرم و به‌صورت گوگرد و مرکب از مواد بلوری با قطرهای بین ۰/۱ و ۰/۲ میکرون می باشد. به‌دنبال واکنش هیدراتاسیون سیمان، هیدروکسید کلسیم آزاد شده درحدود ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم ملات را تشکیل می‌دهد و این در حالی است که این جزء می‌تواند به سادگی در آب حل شده و به خارج از بتن انتقال یابد (در معمول به صورت گرد کربنات کلسیم روی سطح بتن رسوب می کند)، در نتیجه ضمن ایجاد فضای خالی و افزایش خلل و فرج در بتن، از ویژگی‌های مکانیکی و دوام آن می‌کاهد. سولفات‌ها نیز می‌توانند با هیدروکسید ترکیب شده و ضمن تولید گچ یا سولفور آلومینات کلسیم، حجم آنرا چندین برابر افزایش دهند. این تغییر حجم باعث ایجاد ترک و آسیب دیدگی بتن می شود. واکنش‌های قلیایی سنگدانه‌ها نیز با وجود هیدروکسیدکلسیم در خمیر سیمان تشدید می‌شود. به دین ترتیب هیدروکسید کلسیم جزء تضعیف کننده مخلوط بتن بوده و به علت ناپایداری، منشاء ضعف بتن است [10]. حضور کریستال‌های بزرگ هیدروکسید کلسیم در سطح مشترک سنگدانه و خمیر سیمان، سبب می شود که با ایجاد مانعی در برابر تولید کریستال‌های سخت و مقاوم، از یک پیوند خوب پیشگیری شود. استفاده از میکروسیلیس در بتن با کاهش کریستال‌های ناپایدار، موجب می شود که پیوستگی بین خمیر سیمان مصالح سنگی بهبود یابد. بنابراین، در بتن دارای میکروسیلیس با بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگدانه مقاومت بتن نیز افزایش می یابد. این تاثیر عامل اصلی افزایش مقاومت بتن می باشد.

خاکستربادی. خاکستر بادی محصول نوعی سوخت ذغال سنگ است و کانی‌های تشکیل دهنده آن شامل اکسیدهای سیلیس، آلومین و آهن و کلسیم است. در نیروگاه‌هایی که از ذغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می‌کنند، ذرات شیشه‌ای و کروی شکل بسیار ریز به ابعاد ۱ الی ۸۰ میکرون و در درجه ی ۱٦۰۰ درجه سیلیسیوس به عنوان محصول فرعی تولید می شود که از بالای کوره احتراق خارج و به سرعت سرد می شود. این محصول در مقایسه با ابعاد دانه‌ای سیمان که مقاومت سیمان را فراهم می‌کند کمی درشت بوده و در مقایسه با ابعاد دانه‌ای دوده سیلیسی که به شکل ذرات کروی شکل کوچک هستند، بسیار درشت اند. لازم بذکر است که ابعاد دانه‌ای سیمان مابین ۱۰ الی ۲٤ میکرون و ابعاد دانه‌ای دوده سیلیسی

۰/۱ تا ۰/۲ میکرون می باشد. این محصول که خواص پوزولانی دارد، خاکستر بادی نام دارد و از اختلاط دو فاز شیشه‌ای نشده که ٦۰ الی ۹۰ درصد وزنی محصول را تشکیل می دهد و فاز بلوری نشده که ۱۰ الی ٤۰ درصد وزنی محصول را تشکیل می دهد، تشکیل شده است. معمولاً خاکستر بادی به دو نوع تقسیم بندی می شود. چنانچه مجموع درصد وزنی سه کانی اکسیدهای سیلیس، آلومینیوم و آهن دست کم ۷۰ درصد وزنی محصول و اکسیدکلسیم کمتر از ۱۰ درصد وزنی محصول را تشکیل دهد، این محصول خاکستر بادی نوع F و یا کم کلسیم نامیده خواهد شد. چنانچه مجموع درصد وزنی سه کانی اکسیدهای سیلیس و آلومینیوم و آهن دست کم ۵۰ درصد وزنی محصول و اکسیدکلسیم بیشتر از ۱۰ درصد وزنی آن را تشکیل دهد، این محصول خاکستر بادی نوع C و یا پرکلسیم نامیده می شود. خاکستر بادی نوع F ویژگی پوزولانی و خاکستر نوع C افزون بر ویژگی های پوزولانی، ویژگی‌های سیمانی دارد [11]. ویژگی‌ها و کیفیت خاکستر بادی به عامل‌های گوناگونی مانند نوع ذغال سنگ و ترکیب آن، کارایی آسیاب خردکننده ذغال، شرایط احتراق شامل درجه حرارت و مقدار اکسیژن لازم برای سوختن و نوع کوره و به ویژه سرعت سرد شدن ذرات بستگی دارد.

فوق روان ساز. فوق روان کننده ها، کاهنده های قوی آب نیز خوانده می‌شود، زیرا در مقایسه با مواد افزودنی کاهنده آب معمولی، سه تا چهار برابر بیشتر می‌توانند آب در مخلوط بتنی را کاهش دهند. فوق روان کننده‌ها باعث کاهش کشش سطحی آب شده و روانی مجموعه را به میزان زیادی افزایش می‌دهند [12]. در پژوهش حاضر از یک نوع فوق روان کننده با ویژگی‌هایی که در ادامه بیان می شود، به منظور ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده است، که فوق روان کننده نوترال به نام بتن شیمی ۱۰۲N محصول شرکت بتن شیمی می‌باشد. این فوق روان کننده برای افزایش کارآیی بتن و کاهش آب اختلاط با روانی ثابت و افزایش مقاومت نهایی بتن به‌کار می رود و با استاندارد ASTM-C494 نوع F و استاندارد ASTM-C1017 نوع I مطابقت دارد. میزان مصرف این فوق روان کننده طبق آئین نامه بین ۱ تا ۲ درصد وزن مصالح سیمانی بنا به برودت هوا و کارآئی بتن پیشنهاد شده است. وزن مخصوص این فوق روان کننده ۱۰۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و دارای رنگ صورتی بات PH حدود ۷ می باشد و به‌صورت مایع توانایی حل شدن در آب را دارد.

طرح اختلاط

در طول این پژوهش برای ساخت نمونه و طرح اختلاط انواع بتن سبک‌دانه از ASTM -C330 [6]، C192- ASTM [13]، AST-C567[14]، ACI-211.2 [8] و ACI -318 [15] استفاده شده است. به طور کلی نمونه‌های مکعبی بتنی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر در هر وجه، برای آزمون مقاومت فشاری به روش تعیین مقاومت فشاری آزمایشگاهی و همچنین به روش پیچش ساخته شده‌اند. جدول‌های محاسبات طرح اختلاط بر اساس رابطه‌های درج شده در ACI-211.2 [8] و به روش حجمی مطلق محاسبه شده است. در جدول ٤، طرح اختلاط انواع بتن‌های سبک‌دانه با طرح اختلاط به نسبت مشابه بدون استفاده از مواد افزودنی معدنی ارائه شده است. در ادامه برای هر کدام از سبک‌دانه‌ها، با توجه به نوع سبک‌دانه، از میکروسیلیس با ۳ درصد متفاوت ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ و از خاکستر بادی به اندازه ۲۰ ٪ وزنی مصالح سیمانی، استفاده شده است.

آنچه که در جدول‌های (٤)، (٦)، (۷) و(۸) بیان شده است، روندی از مقدارهای محاسباتی طرح اختلاط برای مقایسه ۳ سبک‌دانه با یکدیگر می باشد.

لازم به یادآوری است که همه مقدارهای وزنی در محاسبات طرح اختلاط بر اساس کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

جدول٤ جدول محاسباتی مقایسه طرح اختلاط میان ۳ بتن سبک‌دانه ساخت شده از لیکا،اسکریا و پرلیت

نوع بتن	نسبت آب به سیمان	حجم خمیره سیمان	مقدار وزن سیمان	مقدار وزنی آب	حجم ماسه	مقدار وزن ماسه	مقدار حجم سبک‌دانه	مقدار وزن سبک‌دانه	درصد حجم هوا	مقدار درصد روان کننده
بتن سبک‌دانه با لیکا	۰/۲۵	۰/۳	۵۷۹/۲	۱٤۵	۰/۲۸	۷٤۲	۰/٤	۲٤۲/٦	۰/۰۲	۲
بتن سبک‌دانه با اسکریا	۰/۲۵	۰/۳	۵۳۵/۷	۱۳٤	۰/۲۸	۷٤۲	۰/٤	۳۲۰	۰/۰۲	۲
بتن سبک‌دانه با پرلیت	۰/۲۵	۰/۳۵	۷۷۲/٦	۱۹٤	۰/۲۳	٦۰۹/۵	۰/٤	۱۳۰	۰/۰۲	۲

بـرای رسـیدن بـه طـرح اخـتلاط بـتن سـبک، از رابطه‌هـای آئـین نامـه هـای ACI -211.2 [8]و و318- ACI [15]به صورت زیر استفاده می شود :

$$m>fck+\lambda\times Sn \qquad (1)$$

که در آن :

m : میانگین مقاومت نمونه ها

Sn: انحراف معیار استاندارد مقاومت نمونه‌ها

Fck : مقاومت مشخصه بتن

λ: ضریبی که به شمار نمونه‌ها در تحلیل آماری بستگی دارد.

ضریب تغییرات حدود ۵ تا۱۰ درصد برای مقاومت و ۳ تـا ۵ درصـد بـرای چگـالی اسـت. انحـراف معیـار استاندارد برابر حاصلضرب ضریب تغییـرات در میـانگین مقاومت است.

مقاومت سبک‌دانه‌ها: پیشنهاد می‌شود که ملات بتن مقاومتی حدود دو برابر مقاومت سبک‌دانه‌ها داشته باشـد. میانگین مقاومت سبک‌دانه‌ها با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Fla=a\times10^{\wedge}(b\rho/1000) \qquad (2)$$

که در آن a و b ضریب‌هایی بر اساس جـدول (٤-۹) و ρ چگالی دانه‌ای سبک‌دانه بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب است.

برای همه سبک‌دانه های طبیعی یـا تولیـد شـده در کارخانه، رابطـه‌هـای متفـاوتی میـان مقاومـت و چگـالی دانه‌ای سبک‌دانه‌ها موجود می‌باشـد. روش‌هـای ویـژه‌ای برای اندازه‌گیری مقاومت دانه‌های سـنگدانه وجـود دارد. به دلیل اینکه دانه‌ها با زمینه پیرامون خـود، یعنـی خمیـره سیمان یا ملات، اندرکنش دارند، روش انـدازه گیـری بـر پایه‌ی برآورد مقاومت سنگ‌دانه در بتن است. نتیجه‌هـای به‌دست آمده برای برآورد ضـریب‌هـای a و b در معادلـه (۲) استفاده می‌شود.

رابطه میان مقاومت ملات، سبک‌دانه‌ها، بتن و حجم ملات یا حجم سبک‌دانه‌ها با اسـتفاده از رابطـه‌هـای زیـر محاسبه می‌شود:

$$m= vla\times\log\ fla + vm\times\log\ logffm \qquad (۳-الف)$$

و یا:

$$\log f_M = (\log f_{con} - v_{la}\times\log f_{la})/(1-v_{la}) \qquad (۳-ب)$$

که در آن :

f_{con} : مقاومت بتن، f_{la} : مقاومت سبک‌دانه، f_M : مقاومت ملات، v_{la} : حجم دانه‌های سبک‌دانه و v_M : حجم ملات است.

جدول۵ مقدارهای دو ضریب a و b برای استفاده درمعادله ۲

شماره سنگ‌دانه	a	b
۱	۱/۵۲	(۱/۰۳،۱/۰۸)۱/٤
۲	۱/۱۲	(۱/۱۱،۱/۱٦)۱/۲۲
۳	۱	(۱/۱٤،۱/۱۵)۱/۲۵
٤	۰/۸۹	(۱/۱۷،۱/۲۷)۱/۲۸

مقدارهای نشان داده شده در پرانتز برای ضریب b در جدول (۵) ، با ۵ و ۱۰درصد رطوبت سنگ‌دانه است. مقدار درصد رطوبت بر روی ضریب a تاثیری ندارد و یا تاثیر آن بسیار اندک می‌باشد.

مقاومت فشاری ملات: مقاومت فشاری ملات را می‌توان با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه کرد. در این جا فرض می شود سیمان پرتلند معمولی و ماسه طبیعی استفاده شده و نوع و اندازه نمونه‌ها برای آزمایش‌ها ملات و بتن یکسان است.

$$f_M = A\,10^{-B\times W/C} \qquad (٤)$$

که در آن A و B ضریب‌هایی هستند که به صورت تجربی تعیین می‌شوند.

با ضریب‌های A=۱٤۰ و B=۰/۸۷ (سیمان پرتلند معمولی پس از ۲۸ روز و نسبت آب به سیمان یا آب به مواد سیمانی بیشتر از ۰/۳)، مقاومت فشاری برابر است با:

$$f_M = 140\times 10^{-0.87\,W/C}$$

یا

$$W/C = \log(140/f_M)/0.87 \qquad (۵\text{-الف})$$

در حالتی که ۰/۲۵>W/C>۰/۲ باشد، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$f_M = 160\times 10^{-0.87\,W/C} \qquad (۵\text{- ب})$$

و در حالتی که ۰/۳۰>W/C>۰/۲۵ باشد، ضریب A با درون‌یابی باید تعیین شود.

با توجه به تعریف پذیرفته شده، نسبت آب به سیمان برابر است با:

$$W/C = W\times 10^3/C$$

که در آن W مقدار آب برحسب m^3/m^3 و C مقدار سیمان برحسب کیلوگرم بر مترمکعب است. این رابطه برای ماسه طبیعی اعتبار دارد و برای ماسه سبک و نسبت آب به سیمان بیشتر از ۰/۸ توصیه نشده است.

در برخی موردها هوای اضافی به بتن وارد می‌شود. مانند هنگامی که مقاومت در برابر یخبندان و نمک‌های یخ زدا مورد نیاز است. در این حالت معادله (۵-الف) به معادله (۵-ج) تبدیل می‌شود:

$$W_a = \log(176/f_M) \qquad (۵\text{-ج})$$

که در آن W_a به صورت $(W+V_1)\times 10^3/C$ و V_1 حجم هوای وارد شده در بتن برحسب m^3/m^3 تعریف می‌شود. حجم هوا در این معادله نباید بیش از ۱۰ درصد حجم کل بتن باشد.

حجم خمیر سیمان: حجم خمیر سیمان یا مواد سیمانی باید با اصل حجم ثابت خمیر سنگدانه سازگاری داشته باشد و در حدود ۳۰ درصد حجم کل بتن باشد. حجم خمیر سیمان به عامل‌های زیادی بستگی دارد، برای مثال می‌توان به نوع و شکل سنگدانه، قوام، پایداری مخلوط بتن، مقاومت ملات یا بتن و جذب آب سبک‌دانه اشاره کرد. تجربه نشان داده که حتی برای بتن‌های با وزن معمولی، حجم خمیر سیمان یا مصالح سیمانی بیشتر در محدوده ۳۰ ± ۲ درصد قرار دارد. در برخی موردها به ویژه در بتن‌های بسیار پر مقاومت که در آن از دوده سیلیس استفاده می‌شود، حجم خمیر مواد سیمانی ممکن

است به ۳٤ درصد نیز برسد. هوای اضافی وارد شـده بـه بتن نیز در حجم خمیر سیمان تاثیر می‌گذارد و حباب‌های ریز هوا موجب تغییرات رئولوژیک بتن تازه مـی شـود و کارآیی بتن را بهبود می‌بخشد.

عیار سیمان: عیار سیمان با استفاده از رابطه زیـر محاسـبه می‌شود:

$$C = 1000 \times v_p / (0\cdot31 + W/C) \quad ((Kg/m^3)) \qquad (٦)$$

که در آن v_p حجم خمیر سیمان موجود در بتن است.

حجم ماسه: حجم ماسه از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$v_s = 1 - (v_p + v_{la} + v_{air}) \qquad (٦-١)$$

که در آن v_{la} حجم سبک‌دانه و v_{air} حجم هوای موجود در بتن است. به طور طبیعی حجم هوا ١/٥-٢ درصد از حجم کل بتن است. در بتن‌هـای بـا هـوای اضـافی وارد شده، کل حجم هوای اندازه‌گیری شده و یا محاسبه شده، در رابطه وارد می شود.

چگالی تـوده‌ای بـتن: چگـالی بـتن را مـی‌تـوان از حاصل جمع وزن همه اجزای بتن متـراکم شـده در یـک متر مکعب آن به دست آورد و یـا از رابطـه زیـر اسـتفاده کرد:

$$y_{con} = v_{la} \times y_{la} + y_M \times (1 - v_{la}) \qquad (\text{٧- الف})$$

یا

$$y_{con} = v_{la} \times y_{la} + v_M \times y_M \qquad (\text{٧- ب})$$

y_{con} چگالی توده‌ای بتن، y_{la} میانگین چگـالی دانـه‌ای سبک‌دانه‌ها و y_M چگالی ملات، می‌باشند.

جدول ٦ جدول محاسباتی طرح اختلاط برای بتن سبک ساخته شده از لیکا با افزودنی

محدوده مقاومتی در نظر گرفته شده برای محاسبات (MPa)	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰
میانگین مقاومت نمونه‌ها (MPa)	۳۳/٥	۳۳/٥	۳۳/٥	۳۳/٥
مقاومت ملات محاسباتی Fm	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰	۱۱۰
نسبت آب به مصالح سیمان w/c	۰/۲۷۷	۰/۳۱۱	۰/۳۲٥	۰/۳۰٤
حجم خمیره سیمان Vp	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
مقدار وزن سیمان C	٦٥٥	٦۲۰/٥	٥۸٦	٥٥۲
آب اختلاط موثر W (Lit)	۱۹۱	۲۱٥	۲۲٤/٥	۲۱۰
حجم ماسه Vs	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸
مقدار وزن ماسه S	۷٤۲	۷٤۲	۷٤۲	۷٤۲
حجم سبک‌دانه Vla	۰/٤	۰/٤	۰/٤	۰/٤
وزن سبک‌دانه La	۲٤۲/٦	۲٤۲/٦	۲٤۲/٦	۲٤۲/٦
حجم هوا Va	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
مقدار درصد میکروسیلیس از وزن کل سیمان	٥	۱۰	۱٥	۰
مقدار درصد خاکستر بادی	۰	0	0	۲0
مقدار درصد فوق روان کننده	2	2	2	2

جدول ۷ جدول محاسباتی طرح اختلاط برای بتن سبک ساخته شده از پرلیت با افزودنی

محدوده مقاومتی در نظر گرفته شده برای محاسبات (MPa)	بیش از ۲۰	بیش از ۲۰	بیش از ۲۰	بیش از ۲۰
میانگین مقاومت نمونه‌ها (MPa)	۲۳	۲۳	۲۳	۲۳
مقاومت ملات محاسباتی Fm	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵	۱۰۵
نسبت آب به مصالح سیمان w/c	۰/۳	۰/۳۱۵	۰/۳۳	۰/۳۱
حجم خمیره سیمان Vp	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵
مقدار وزن سیمان C	۷۳٤	٦۹٥/٤	٦٥٦/۷	٦۱۸/۱
آب اختلاط موثر W (Lit)	232	243	255	240
حجم ماسه Vs	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸	۰/۲۸
مقدار وزن ماسه S	۷٤۲	۷٤۲	۷٤۲	۷٤۲
حجم سبک‌دانه Vla	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵
وزن سبک‌دانه La	۱۱۳/۸	۱۱۳/۸	۱۱۳/۸	۱۱۳/۸
حجم هوا Va	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
مقدار درصد میکروسیلیس از وزن کل سیمان	5	10	15	0
مقدار درصد خاکستر بادی	0	0	0	20
مقدار درصد فوق روان کننده	2	2	2	2

جدول۸ جدول محاسباتی طرح اختلاط برای بتن سبک ساخته شده از اسکریا با افزودنی

محدوده مقاومتی در نظر گرفته شده برای محاسبات (MPa)	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰	بیش از ۳۰
میانگین مقاومت نمونه‌ها (MPa)	۳٤	۳٤	۳٤	۳٤
مقاومت ملات محاسباتی Fm	۸۰	۸۰	۸۰	۸۰
نسبت آب به مصالح سیمان w/c	۰/۳۲۱	۰/۳٥٥	۰/۳٦۲	۰/۳٥٦
حجم خمیره سیمان Vp	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۰/۳
مقدار وزن سیمان C	٥۲٤/۸	٥۰٦/۳	٤٦۹/٦	٤٤۸/۸
آب اختلاط موثر W (Lit)	۱۷۷	۱۹۷	۲۰۰	۱۹۷
حجم ماسه Vs	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۲۳
مقدار وزن ماسه S	٦۰۹/٥	٦۰۹/٥	٦۰۹/٥	٦۰۹/٥
حجم سبک‌دانه Vla	۰/٤٥	۰/٤٥	۰/٤٥	۰/٤٥
وزن سبک‌دانه La	۳٦۰	۳٦۰	۳٦۰	۳٦۰
حجم هوا Va	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
مقدار درصد میکروسیلیس از وزن کل سیمان	٥	۱۰	۱٥	۰
مقدار درصد خاکستر بادی	۰	۰	۰	۲۰
مقدار درصد فوق روان کننده	۱/٥	۱/٥	۱/٥	۱/٥

مخلوط کردن مصالح اولیه برای رسیدن به بتن تر

در ابتدا سنگ‌دانه‌های طبیعی معمولی و سبک‌دانه‌ها به ترتیب از چگالی کم به چگالی زیاد وارد ظرف مخلوط کن شده و با یکدیگر آمیخته شده‌اند. زمان اختلاط برای این مرحله به صورت چشمی بوده و هنگامی که هم‌گنی تقریبی بین سنگدانه‌ها مشاهده شد، عملیات مرحله‌ی بعدی انجام پذیرفت. در مرحله‌ی بعدی، در حدود یک سوم آب مورد نیاز و موثر اختلاط به مخلوط قبلی افزوده و زمان اختلاط بر این اساس تنظیم شد: ۱/۵ دقیقه اختلاط، ۳ دقیقه استراحت، ۱/۵ دقیقه اختلاط و ۳ دقیقه استراحت. پس از این مرحله، سیمان و مصالح دیگر سیمانی (در صورت وجود) به همراه یک سوم دیگر آب موثر به مخلوط قبلی اضافه و اختلاط به اندازه ۲ دقیقه انجام شد. پس از این مرحله، یک سوم باقی‌مانده آب به همراه افزودنی‌های شیمیایی (در صورت وجود) به‌صورت محلول به مخلوط قبلی افزوده و اختلاط نهایی به مدت ٤ دقیقه انجام گرفت. پس از پایان این مرحله‌ها مخلوط بتنی سبک‌دانه حاصل می شود.

روش پیچش

روش «پیچش» که به تازگی نادری [١٦] آن را به عنوان آخرین و جدیدترین روش از گروه روش‌های «دارای خرابی جزیی» ابداع کرده است، یک روش دقیق با کاربری گسترده در تعیین مقاومت بتن هم در آزمایشگاه و هم در محل سازه بوده و به عنوان یک فن سریع، دقیق و کم هزینه با خرابی بسیار جزیی به حساب می‌آید . جذابیت این روش در دقت، سرعت انجام، سادگی، خرابی جزیی و هزینه اندک انجام آن است که آن را در مقایسه با دیگر آزمایش‌های درجا ممتاز ساخته است. این آزمایش در حالت‌های افقی، قائم و به طور کلی بر روی هر سطح صافی به سادگی و بدون نیاز به برنامه‌ریزی قبلی قابل انجام است. ابزار مورد استفاده در این آزمایش بسیار ساده و قابل دسترس بوده و انجام آزمایش نیز نیاز به مهارت قبلی ندارد. روش آزمایش بر این اساس استوار است که یک استوانه فلزی به قطر ٤٠ و ارتفاع ٢٥ میلی متر، به کمک چسب که درمعمول یک ماده اپوکسی دو قسمته است، بر روی محل آزمایش که از قبل با سمباده تمیز شده، چسبانده می‌شود. پس از خشک شدن چسب و اتصال کامل استوانه فلزی به سطح بتن، به وسیله یک پیچش سنج دستی معمولی (Torque meter)، گشتاور پیچشی مستقیم به این استوانه وارد شده و به طور پیوسته و یکنواخت تا لحظه گسیخته شدن بتن از سطح زیرین استوانه افزایش می‌یابد. مقدار لنگر پیچشی که باعث کنده شدن استوانه فلزی از سطح بتن شده، ثبت و با به کارگیری نمودار واسنجی (Calibration) وابسته به آن، مقاومت معادل فشاری بتن برآورد می‌شود. خرابی حاصل از انجام این آزمایش بسیار جزیی بوده و در صورت نیاز به سادگی به کمک ملات و با دست ترمیم می‌شود[١٦]. آزمایش‌های وسیعی که در تعیین مقاومت در جای بتن با استفاده از این روش صورت گرفته است، نشان می‌دهد که یک همبستگی تقریبی خطی میان مقاومت فشاری بتن و مقاومت حاصل از روش پیچش وجود دارد، به طوری که مقاومت فشاری، با یک تابع تقریبی خطی از مقاومت پیچشی نهایی وارد شده متناظر است. بنابراین با در اختیار داشتن مقاومت حاصل از روش پیچش و مراجعه به نمودارهای واسنجی می‌توان مقاومت فشاری بتن را با دقت بسیار بالایی اندازه‌گیری کرد. البته این مقدار برای بتن‌های معمولی در پژوهش‌های قبلی مورد آزمایش قرار گرفته است و مقدار وابستگی خطی بین این ۲ عامل برای بتن با وزن طبیعی ۰/۹۸٦ گزارش شده است[۱۷]. در این مقاله رابطه‌های حاصل از این روش برای بتن سبک‌دانه با لیکا، پرلیت و اسکریا محاسبه و ارائه شده است.

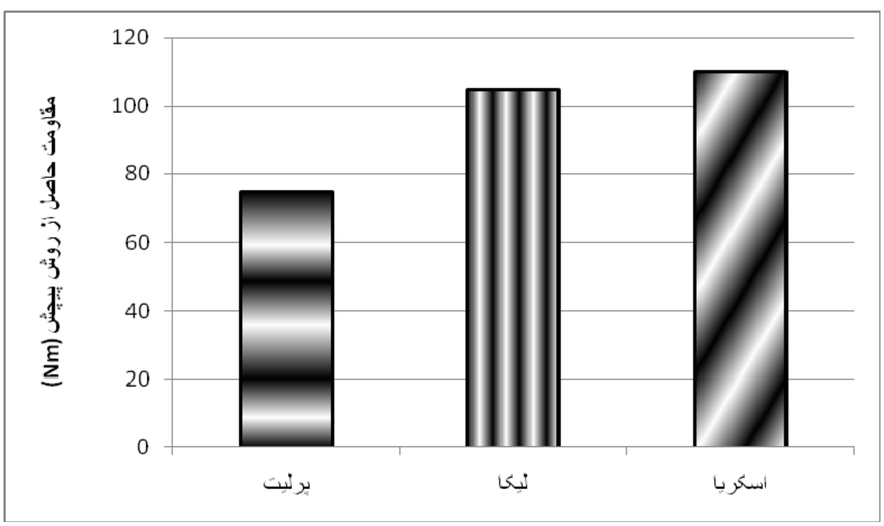
نتیجه آزمایش‌ها وتحلیل آن‌ها

آنچه که در این بخش به آن اشاره می‌شود، نتیجه‌های حاصل از پژوهش‌های آزمایشگاهی در مورد مقاومت در جای بتن ساخته شده با ۳ سبک‌دانه لیکا، پرلیت و اسکریا همراه با موادافزودنی شیمیائی و معدنی در زمینه میزان

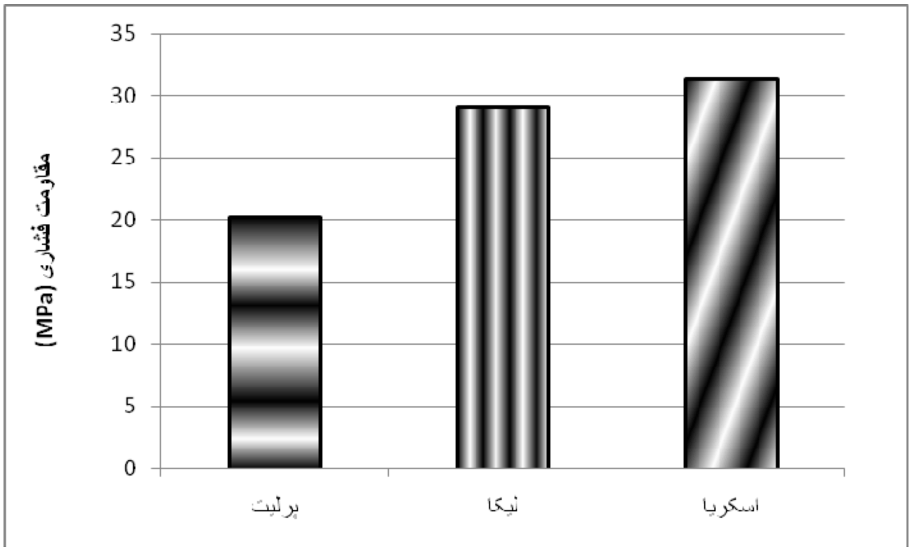
مقاومت فشاری تحملی نمونه های مکعبی بتنی ۱۰×۱۰× ۱۰سانتیمتر به دو روش آزمون مقاومت فشاری و روش پیچش، می باشد که در قالب جدول و نمودار بیان شده است. در این پژوهش بتن های سبک‌دانه با استفاده از افزودنی‌های شیمیایی و معدنی ساخته شده و هدف از به‌کارگیری این افزودنی‌ها، تولید بتن سبک‌دانه برای بتن سازه ای با مقاومت به نسبت بالا می‌باشد. همچنین بنا به طرح اختلاط جدول (٤)، مقایسه بین ۳ ویژگی مقاومت فشاری تحملی، مقاومت به‌دست آمده از روش پیچش و وزن مخصوص برای ۳ سبک‌دانه با طرح اختلاط به نسبت مشابه در قالب جدول (۹) و منحنی شکل‌های (۱)، (۲) و (۳) بیان شده است. آنچه از نتیجه‌های این پژوهش بر می‌آید، در شرایط طرح اختلاط مشابه، برای بتن سبک‌دانه با استفاده از پوکه معدنی اسکریا، مقاومت فشاری ۳۱/٤ مگاپاسکال و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش ۱۱۰ نیوتن متر به‌دست آمده است. همچنین، برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا، مقاومت فشاری ۲۹/۱ مگاپاسکال و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش ۱۰۵ نیوتن در متر به‌دست آمده است. برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت، مقاومت فشاری ۲۰/۳ مگاپاسکال و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش ۷۵ نیوتن در متر به‌دست آمده است. ترتیب نسبت مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش به ترتیب از زیاد به کم به این شرح است: الف) بتن سبک‌دانه با استفاده از اسکریا. ب) بتن سبک‌دانه با استفاده از لیکا. ج) بتن سبک‌دانه با استفاده از پرلیت.

جدول ۹ مقایسه نتایج ۳ بتن سبک‌دانه با طرح اختلاط مشابه

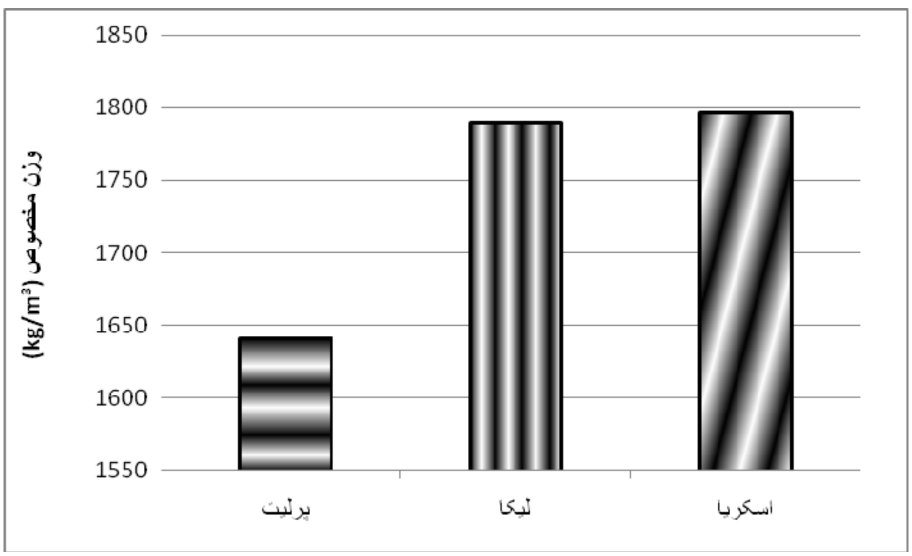
نوع بتن سبک‌دانه	مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	وزن مخصوص (kg/m³)	مقاومت حاصل از روش پیچش (Nm)
بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا	۲۹/۱	۱۷۸۹/۹	۱۰۵
بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت	۲۰/۳	۱۶۴۱/۴	۷۵
بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا	۳۱/۴	۱۷۹۶/۵	۱۱۰



شکل۱ مقایسه ۳ سبک‌دانه با طرح اختلاط مشابه از لحاظ مقاومت حاصل از روش پیچش



شکل۲ مقایسه ۳ سبک‌دانه با طرح اختلاط مشابه از لحاظ مقاومت فشاری



شکل۳ مقایسه ۳ سبک‌دانه با طرح اختلاط مشابه از لحاظ وزن مخصوص

با توجه به طرح اختلاط‌های جدول‌های (٦)، (٧) و (٨)، به‌طور جداگانه در هر یک از بتن‌های سبک‌دانه ساخته شده با لیکا و پرلیت و اسکریا، اثر استفاده از میکروسیلیس و خاکستر بادی بر مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش و همچنین وزن مخصوص بررسی و نتیجه‌های آن در جدول‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) بیان شده است. منحنی اشکال ٤، ٥ و٦ نیز به صورت مقایسه‌ای هر یک از عامل‌های مقاومت فشاری، مقاومت حاصل از روش پیچش و وزن مخصوص را در ۳ درصد متفاوت ٥٪، ۱۰٪ و ۱٥٪ از میکروسیلیس و همچنین ۲۰٪ خاکستر بادی، برای هر یک از ۳ سبک‌دانه، بیان کرده اند. در بتن سبک‌دانه با لیکا، با استفاده از ۱۰ ٪ میکروسیلیس مقاومت فشاری ۳٤/۲۳ مگاپاسکال و متناظر با آن مقاومت حاصل از

روش پیچش ۱۳٦/۷۵ نیوتن در متر حاصـل شـده اسـت. یافته‌ها نشان می‌دهند که در هر ۳ میزان درصد ۵٪ و ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، اثرهـای بهتـری بـر روی مقاومـت فشاری بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا، نسبت به حالتی که از ۲۰٪ خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنی معدنی در ساخت بتن استفاده می‌شود، به‌دست آمـده اسـت. مقـدار مقاومت فشاری حاصـل از ۱۰٪ و۱۵٪ میکروسـیلیس در نمونه های بتن سبک ساخته شده با لیکا، بسیار نزدیـک و با اختلاف کمتر از ۱ مگـا پاسـکال مـی باشـد. در مـورد پرلیـت، میـزان مقاومـت فشـاری بـا اسـتفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس، ۲۲/۱۷ مگاپاسـکال و مقاومـت حاصـل از پیچش متناظر با آن ۸۹/٦۷ نیوتن در متر می‌باشد. مشاهده می‌شود که در ۲ میزان درصد ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسـیلیس، اثرهای بهتری بر روی مقاومت فشـاری بـتن سـبک‌دانـه ساخته شـده بـا پرلیـت، نسـبت بـه حـالتی کـه از ۲۰٪ خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنـی معـدنی در سـاخت بتن استفاده شود، حاصل‌می‌آید. مقـدار مقاومـت فشـاری حاصل از ۱۰٪ و۱۵٪ میکروسـیلیس در نمونـه‌هـای بـتن سبک با پرلیت، بسیار نزدیک به‌هم و با اختلاف کمتـر از ۰/٤ مگا پاسکال می‌باشـد. در مـورد سـبک‌دانـه اسـکریا، میزان مقاومت فشاری بـا اسـتفاده از ۱۵٪ میکروسـیلیس، ۳۷/۷۷ مگاپاسکال و مقاومت حاصل از پیچش متناظر بـا آن ۱۵۲/٤۳ نیوتن در متر می‌باشد. نتیجه آزمایش‌ها نشـان می‌دهند که در ۲ میزان درصد ۱۰٪ و ۱۵٪ میکروسیلیس، اثرهای بهتری بر روی مقاومت فشـاری بـتن سـبک‌دانـه سـاخته شـده بـا اسـکریا، نسـبت بـه حـالتی کـه از ۲۰٪ خاکستر بادی به عنوان ماده افزودنـی معـدنی در سـاخت بتن به کار می‌رود، به دست می‌آید.

جدول ۱۰ نتیجه‌های بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا با مواد افزودنی

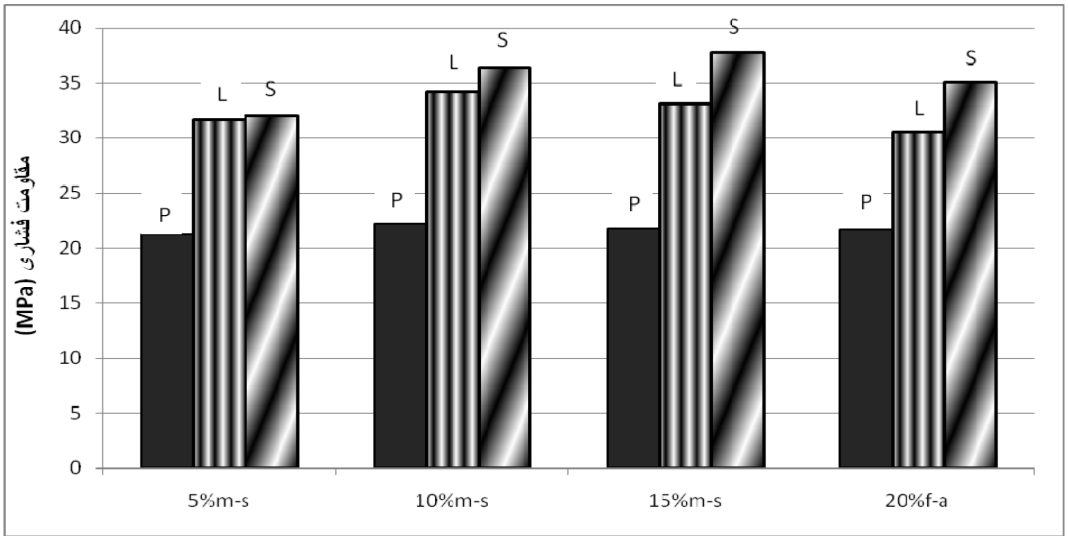
محدوده مقاومتی محاسباتی اولیه	مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	میانگین مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	وزن مخصوص (kg/m³)	میانگین وزن مخصوص (kg/m³)	مقاومت حاصل از روش پیچش برای ۳ وجه از ۱ نمونه (Nm)	میانگین مقاومت حاصل از روش پیچش(Nm)
بیش از ۳۰ مگاپاسکال ۵٪ میکروسیلیس	۳۱/۸	۳۱/۷	۱۸۲۱/۳	۱۸۲۹/۷۳	۱۱٤/۳۲	۱۱۸/۸۱
	۳۱/۱		۱۸۱۱/٥		۱۲۱/۰٥	
	۳۲/۲		۱۸٥٦/٤		۱۲۱/۰٥	
بیش از ۳۰ مگاپاسکال ۱۰٪ میکروسیلیس	۳۲/۳	۳٤/۲۳	۱۸٥٥/۳	۱۸۸۲/۸	۱۲۷/۷۸	۱۳٦/۷٥
	۳٤/٦		۱۸۹۱/٥		۱٤۷/۹٥	
	۳٥/۸		۱۹۰۱/۷		۱۳٤/٥	
بیش از ۳۰ مگاپاسکال ۱۵٪ میکروسیلیس	۳۱/٤	۳۳/۱	۱۸٤۲/۱	۱۸۷٤/٤۳	۱۲۱/۰٥	۱۲٥/٥۳
	۳۳/۷		۱۸۷٥/٦		۱۳٤/٥	
	۳٤/۲		۱۸۸٥/٤		۱۲۱/۰٥	
بیش از ۳۰ مگاپاسکال ۲۰٪ خاکستر بادی	۲۹/٤	۳۰/٥٦	۱۷۹٦/٤	۱۸۲٦/۲۳	۱۰۰/۸۸	۱۰۷/٦
	۳۰/۸		۱۸۲۳/۹		۱۰۷/٦	
	۳۱/٥		۱۸٥۸/٤		۱۱٤/۳۲	

جدول۱۱ نتیجه‌ها برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت با افزودنی

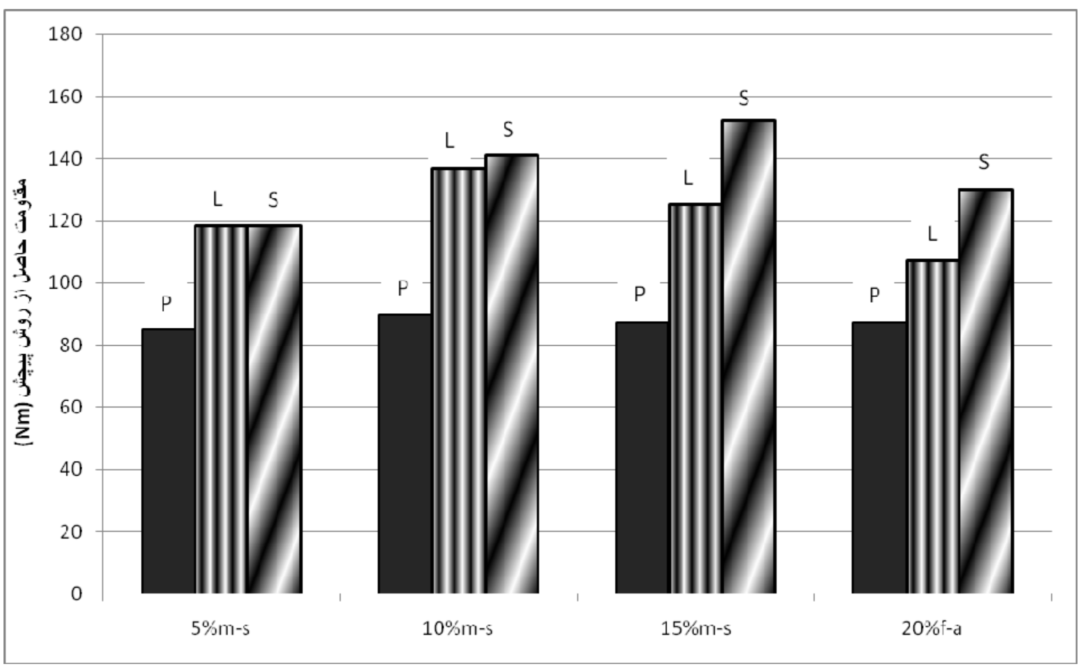
محدوده مقاومتی محاسباتی اولیه	مقاومت فشاری حاصل ازروش مقاومت فشاری (MPa)	میانگین مقاومت فشاری حاصل ازروش مقاومت فشاری(MPa)	وزن مخصوص (kg/m³)	میانگین وزن مخصوص (kg/m³)	مقاومت حاصل از روش پیچش برای ۳ وجه از ۱ نمونه (Nm)	میانگین مقاومت حاصل از روش پیچش (Nm)
بیش از ۲۰	۱۹/۳	۲۱/۲	۱۶۲۲/۱	۱۶۵۳/۵۷	۸۰/۷	۸۵/۱۸
مگاپاسکال۵٪	۲۲/٤		۱۶۷۵/٤		۸۷/٤۲	
میکروسیلیس	۲۱/۹		۱۶۶۳/۲		۸۷/٤۲	
بیش از ۲۰	۲۰/۹	۲۲/۱۷	۱۶۸۳/٥	۱۷۰۹/۰۷	۸۰/۷	۸۹/٦۷
مگاپاسکال۱۰٪	۲۲/۸		۱۷۰۲/۲		۹٤/۱٥	
میکروسیلیس	۲۲/٥		۱۷٤۱/٥		۹٤/۱٥	
بیش از ۲۰	۲۰/٤	۲۱/۸۳	۱٦٤۱/۳	۱٦٥۷/۷	۹٤/۱٥	۸۷/٤۲
مگاپاسکال۱۵٪	۲۲/۳		۱٦۹٤/٥		۸۰/۷	
میکروسیلیس	۲۲/۸		۱٦۹۱/۳		۸۷/٤۲	
بیش از ۲۰	۲۱/۳	۲۱/۷	۱٦٥٤/٥	۱٦۷۸/٥۳	۹٤/۱٥	۸۷/٤۲
مگاپاسکال۲۰٪	۲۲/۱		۱۷۰۲/۸		۹٤/۱٥	
خاکستر بادی	۱۹/۳		۱٦۲۲/۱		۸۰/۷	

جدول ۱۲ نتیجه‌ها برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا با افزودنی

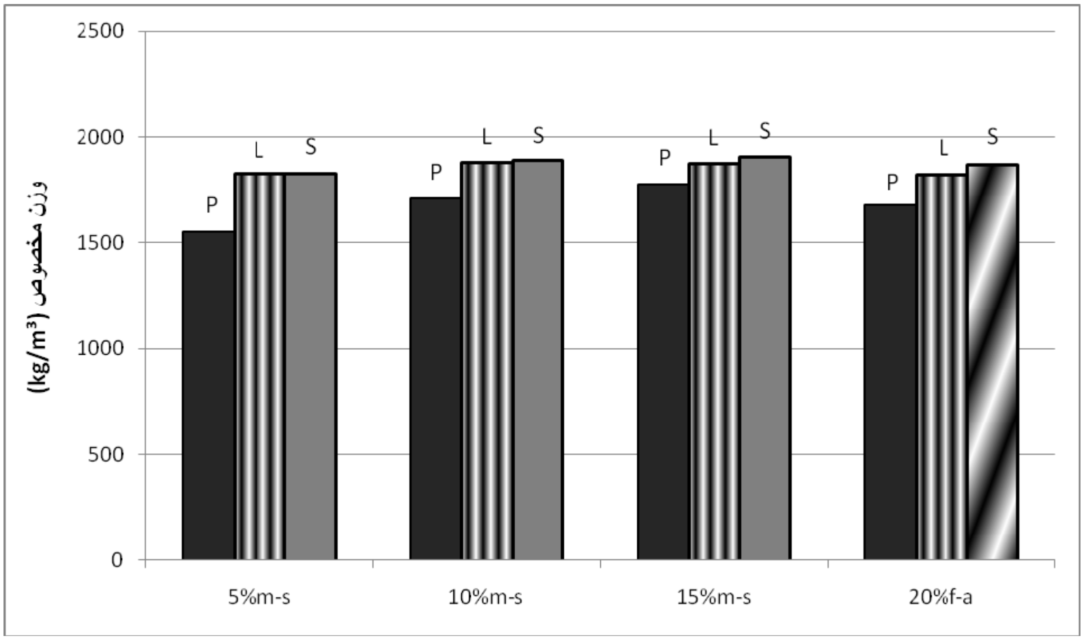
محدوده مقاومتی محاسباتی اولیه	مقاومت فشاری حاصل ازروش مقاومت فشاری (MPa)	میانگین مقاومت فشاری حاصل از روش مقاومت فشاری (MPa)	وزن مخصوص (kg/m³)	میانگین وزن مخصوص (kg/m³)	مقاومت حاصل از روش پیچش برای ۳ وجه از ۱ نمونه (Nm)	میانگین مقاومت حاصل از روش پیچش (Nm)
بیش از ۳۰	۳۰/٤	۳۲/۰۳	۱۷۹۸/۳	۱۸۲۷/۹۳	۱۱٤/۳۲	۱۱۸/۸
مگاپاسکال	۳۲/۸		۱۸۳٤/۲		۱۲۱/۰٥	
۵٪ میکروسیلیس	۳۲/۹		۱۸٥۱/۳		۱۲۱/۰٥	
بیش از ۳۰	۳٤/٦	۳٦/٤۷	۱۸٦٤/٦	۱۸۹۲/۲	۱٤۱/۲۲	۱٤۱/۲۳
مگاپاسکال۱۰٪	۳۷/۲		۱۹۱۰/۳		۱٤۷/۹٥	
میکروسیلیس	۳۷/٦		۱۹۱۰/۷		۱۳٤/٥	
بیش از ۳۰	۳٥/۳	۳۷/۷۷	۱۸۸٤/٦	۱۹۰٦/۷۷	۱٤۷/۹٥	۱٥۲/٤۳
مگاپاسکال۱۵٪	۳۸/۳		۱۹۲۱/٤		۱٤۷/۹٥	
میکروسیلیس	۳۹/۷		۱۹۱٤/۳		۱٦۱/٤	
بیش از ۳۰	۳٤/۳	۳٥/۱	۱۸٦۱/٤	۱۸۷۲/۱	۱۲۷/۷۸	۱۳۰/۰۲
مگاپاسکال۲۰٪	۳٥/٤		۱۸۷٥/٦		۱۳٤/٥	
خاکستر بادی	۳٥/٦		۱۸۷۹/۳		۱۲۷/۷۸	



شکل٤ مقایسه ۳ بتن سبک‌دانه ساخته شده از پرلیت (P)، لیکا(L) و اسکریا(S) از نظر مقاومت فشاری با استفاده از ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ میکروسیلیس و ۲۰٪ خاکستربادی

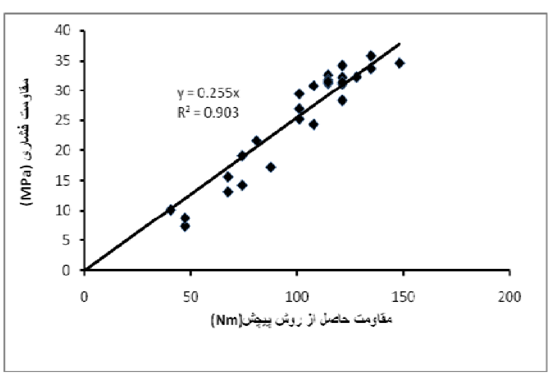


شکل ۵ مقایسه ۳ بتن سبک‌دانه ساخته شده از پرلیت(P)، لیکا(L)و اسکریا(S) از نظر مقاومت حاصل از روش پیچش با استفاده از ۵٪، ۱۰٪ و۲۰٪ میکروسیلیس و ۲۰٪ خاکستربادی

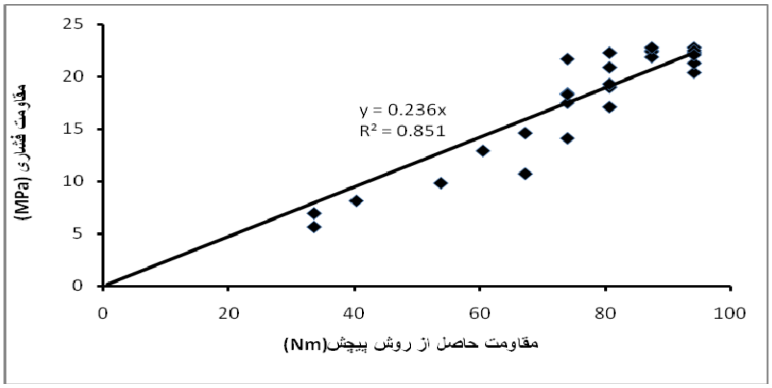


شکل ٦ مقایسه ۳ بتن سبک‌دانه ساخته شده از پرلیت(P)، لیکا(L)و اسکریا(S) از لحاظ وزن مخصوص با استفاده از ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ میکروسیلیس و ۲۰٪ خاکستربادی

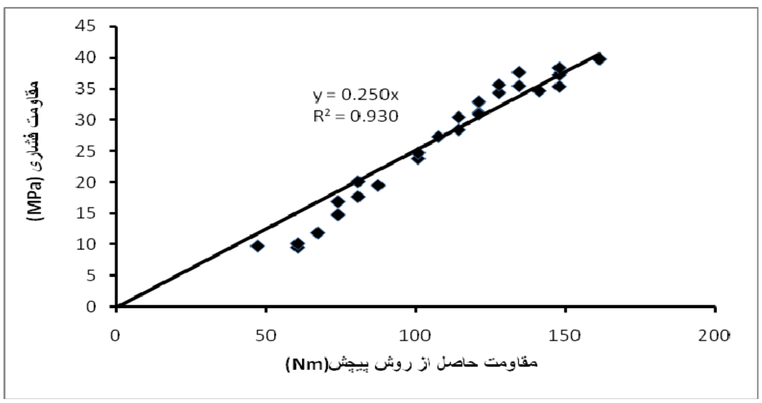
منحنی‌های واسنجی (Calibration) میان دو عامل مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش برای هر یک از سبک‌دانه های لیکا، اسکریا و پرلیت در اشکال ۷، ۸ و ۹ ارائه گردیده است. نتایج حاصل از تحلیل آماری نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که ضریب همبستگی خطی مابین دو عاملمقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش برای بتنهای سبک‌دانه ساخته شده با لیکا ۰/۹۰٤، برای بتنهای سبک‌دانه ساخته با اسکریا۰/۹۳۱ و برای بتنهای سبک‌دانه با پرلیت ۰/۸۵۱ میباشد. روابط تقریباً خطی مابین این دو عامل با توجه به ضرائبی که گزارش شد، وجود دارد و با توجه به منحنی های کالیبراسیون حاصله بین دو عامل بیان شده، این نتیجه حاصل می شود که در مورد بتن های سبک‌دانه ساخته شده با این ۳ سبک‌دانه، چنانچه آزمون پیچش که تست بسیار ساده ای است، چه به صورت آزمایشگاهی و چه به صورت درجا انجام شود، به راحتی اعداد حاصل ازمقاومت حاصل از روش پیچش را با این منحنی های کالیبراسیون می توان به مقاومت فشاری بتن تبدیل نمود. در هر یک از منحنی های زیرمعادله خط عبوری از مبدا مختصات و ضریب همبستگی بیان شده است.



شکل ۷ منحنی همبستگی نتایج مقاومت حاصل از روش پیچش و مقاومت فشاری برای بتن تولید شده با لیکا



شکل ۸ نمودار همبستگی نتیجه‌های مقاومت حاصل از روش پیچش و مقاومت فشاری برای بتن تولید شده با پرلیت



شکل۹ نمودار همبستگی نتیجه‌های مقاومت حاصل از روش پیچش و مقاومت فشاری برای بتن تولید شده با اسکریا

نتیجه گیری

۱- با توجه به نتیجه‌های به‌دست آمده برای سه بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا و پرلیت و اسکریا در شرایط طرح اختلاطی به نسبت مشابه از نظر نسبت حجمی، این نتیجه حاصل می شود که سبک‌دانه اسکریا با توجه به وزن مخصوص دانه‌ای بیشتر نسبت به لیکا و پرلیت، در شرایط مشابه، دارای مقاومت فشاری و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش و وزن مخصوص بیشتری بوده و بدون استفاده از مواد افزودنی معدنی به راحتی در دسته بتن‌های سبک سازه‌ای قرار می‌گیرد. در مورد بتن سبک ساخته شده با لیکا نیز این نتیجه حاصل شده است که این سبک‌دانه نیز می‌تواند بدون استفاده از مواد افزودنی معدنی، بتن سبک با مقدار مقاومت لازم سازه ای را فراهم کند. ولی در مورد پرلیت پراکندگی نتیجه‌ها در زمان ساخت به نسبت بیشتر بوده و با توجه به این موضوع، مقاومت فشاری کمی بیش از ۲۰ مگاپاسکال برای این سبک‌دانه حاصل شده است.

۲- در استفاده از مواد افزودنی معدنی در هر ۳ الگوبتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا، اسکریا و پرلیت، بیشترین مقدار مقاومت فشاری و متناظر با آن مقاومت حاصل از روش پیچش در مورد سبک‌دانه اسکریا و سپس سبک‌دانه لیکا و در آخر بتن سبک‌دانه ساخته با پرلیت میباشد. در بررسی بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا و همچنین پرلیت این نتیجه حاصل می شود که استفاده از میکروسیلیس تا ۱۰٪ وزن مصالح سیمانی، روند رو به رشدی در مقاومت فشاری و متناظر با آن، مقاومت حاصل از روش پیچش حاصل می گرداند. اما با استفاده از ۱۵٪ میکروسیلیس در این دو الگوبتن، مقدار مقاومت

فشاری تغییر محسوسی نداشته و تقریبا مقدار مقاومت فشاری یکسانی را در قیاس با ۱۰٪ میکروسیلیس، به همراه دارد. اما در مورد بتن ساخته شده با اسکریا، روند صعودی مقاومت فشاری و متناظر با آن، مقاومت حاصل از روش پیچش تا هنگامی که ۱۵٪ میکروسیلیس به عنوان ماده افزودنی معدنی در بتن استفاده شود، وجود دارد. آنچه که مشخص است استفاده حتی ۱۰٪ میکروسیلیس به عنوان ماده افزودنی معدنی اثرات بهتری در روند افزایش مقاومت فشاری در هر ۳ الگوبتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا، لیکا و پرلیت نسبت به استفاده از ۲۰٪ خاکستربادی به عنوان ماده افزودنی معدنی داراست. از اینرو پیشنهاد می شود که از میکرو سیلیس به عنوان ماده افزودنی جهت افزایش مقاومت فشاری در قیاس با خاکستربادی در ساخت بتن های سبک‌دانه استفاده شود.

۳- در نتایج بدست آمده مشاهده می شود که استفاده از میکروسیلیس با درصدهای مختلف ۵٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ درهر یک از بتن های سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا، لیکا و پرلیت مقاومت فشاری نمونه بتنی را افزایش می‌دهد. این مقدار افزایش دربتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا بین ۲ ٪ تا ۲۰/۳٪، در بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا بین ۸/۹ ٪ تا ۱۷/۶٪ درصد و برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت بین ٤/٥ ٪ تا ۹/۲ ٪ می باشد. همچنین استفاده از ۲۰ ٪ خاکستربادی به عنوان ماده افزودنی معدنی، باعث افزایش مقاومت فشاری و متناظر با آن لنگر حاصل از روش پیچش در هر نمونه مکعبی بتنی می شود. استفاده از ۲۰٪ خاکستر بادی در بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا، باعث رشد ۱۱/۸٪ مقاومت فشاری نمونه ها، در بتن سبک‌دانه ساخته شده با لیکا باعث رشد ۵ ٪ مقاومت فشاری نمونه ها و در بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت باعث رشد ٦/۹ ٪ مقاومت فشاری نمونه ها می شود.

٤- با توجه به کالیبره نمودن نتایج و حصول نمودارهای کالیبراسیون بین دو عامل مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش برای هر یک از سبک‌دانه ها، ضریب تبدیل مقدارمقاومت حاصل از روش پیچش به مقاومت فشاری در منحنی کالیبراسیون لیکا۰/۲۵۲، در منحنی کالیبراسیون اسکریا ۰/۲۳۹ و در منحنی کالیبراسیون پرلیت۰/۲٤۱ گزارش شده است. از اینرو میتوان با اعمال روش پیچش در هر مکانی در مورد هر یک از ۳ بتن سبک ذکر شده، مقدار مقاومت فشاری هر کدام از این ۳ بتن سبک‌دانه را با کمک نمودار های کالیبراسیون مربوطه تعیین نمود. بیشترین همبستگی نتایج بین دو عامل مقاومت فشاری و مقاومت حاصل از روش پیچش، برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا و کمترین میزان همبستگی نتایج بین این دو عامل برای بتن سبک‌دانه ساخته شده با پرلیت می باشد.

٥- همان طور که از نتایج حاصل شده است، به راحتی می توان از بتن سبک‌دانه ساخته شده با اسکریا و لیکا حتی بدون مواد افزودنی معدنی در فرآیند کاربردی بتن سازه ای استفاده نمود. به طوریکه با استفاده از مواد افزودنی معدنی مثل میکروسیلیس خواص مطلوب تر مقاومتی در بتنهای سبک ساخته شده با اسکریا و لیکا حاصل می گردد. همچنین با کمک مواد افزودنی معدنی مانند میکروسیلیس در بتن سبک ساخته شده با پرلیت، بتن سبک با کارائی نیمه سازه‌ای و حتی سازه‌ای با مقاومت در حدود ۲۰ مگاپاسکال حاصل شده است.

مراجع

1. Spitzer J. "A Review of the Development of Lightweight Aggregate, History & Actual Survay", *Proc, Int, Symp, Structural Lightweight Concrete,* Norway; pp. 13-21, (1995).
2. handaker M, and Hossain A., "Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight

Concrete", Department of Civil Engineering, Ryerson University; (2006).

3. Imura, S, kaniva, H, Horio M, and Kimura, K., "A Novel Fluidized Bed Manufacturing of High Performance Artificial Lightweight Aggregate Concrete", Kristiansand, Norway; pp. 611-613, (2000).
4. STM-C332, Standard Specificateion for Lightweight Aggregate for Insulting Concrete, American Society of Testing Material; (1999).
5. roghee Satah JO. Evaluation of Lightweight Concrete Mixtures for Bridge Deck and Prestressed Bridge Girder Applications, Thesis for The Degree Master of Science, Department of Civil Engineering, Kansas State University; (2006).
6. STM–C330, Specificateion for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, American Society of Testing Material; (2004).
7. STM-C33, Standard Specification for Concrete Aggregates, American Society of Testing Material; (2000).
8. CI–211.2 Standatd Practice for Selecting Proportion for Structural Lightweight Concrete, American Concrete Institute; (1998).
9. STM-C150/150M, Standard Specification for Portland Cement, American Society of Testing Material; (2009).
10. TM-C1240, Standard Specification for Silica Fume for Use as a Mineral Admixture in Hydraulic Cement Concrete, American Society of Testing Material; (1997).
11. I-211.1R, Guide for Use of Admixturers in Concrete, part 1:Material and General Properties of Concrete, American Concrete Institute; (1984).
12. I-212.4R, Guide for the Use of High-Range Water-Reducing Admixtures (Superplasticizers) in Concrete, American Concrete Institute; (2004).
13. TM-C192/192M, Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratoty, American Society of Testing Material; (2007).
14. TM-C567, Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete, American Society of Testing Material; (2000).
15. ACI–318, Building Code Requirements for Structural Concrete, Part 1-3, Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute; (2005).
16. Naderi M. New Twist–off Method for the Evaluation of In–Situ Strength of Concrete, ASTM Journal of Testing and Evaluation, Volume 35, Issue 6; (2007).

۱۷. نادری، محمود، "روشهای بهبود و تعیین آزمایشگاهی و درجای مقاومت بتن"، انتشارات روزبهان، تهران، (۱۳۸۸)، صفحات ۱۴۳ تا ۱۸۷.